

용접변형의 방지 및 교정

박 정 응

Prevention and Correction of Welding Deformation

Jeong-Ung Park

1. 서 언

용접프로세스는 강구조물을 접합하는 다른 방법들에 비해 많은 장점을 가지고 있음에도 불구하고 용접열원에 의한 국부적 급속가열·급속냉각에 따른 불균일한 온도분포로 인해 열응력을 발생시키고, 이로 인해 용접부 근방에 소성변형이 발생하여 결과적으로 용접잔류응력과 용접변형이 필연적으로 발생한다. 이러한 소성변형은 구속이 클수록, 최고도달온도가 높을수록 크게 발생하는 경향을 보인다.

용접잔류응력과 용접변형은 상호 밀접한 관계가 있다. 예를 들면 용접조건이 동일한 경우 구속이 강하면 용접변형은 감소하나, 잔류응력은 구속이 강한 만큼 증가한다. 또한, 동일한 구속조건인 경우 용접변형, 특히 수축량이 큰 횡수축변형을 적게 할 수 있는 시공조건(적층, 용접순서 등)을 선택하는 것이 구조물의 구속에 의한 영향을 최소화할 수 있는 적절한 방법이라 할 수 있다.

용접잔류응력과 용접변형은 구조물의 강도를 저하시키고, 미관을 손상시킬 뿐 아니라 구조물의 치수를 변화시켜 생산성을 저하를 초래한다. 따라서 용접변형을 사전에 발생하지 않도록 방지하는 것이 최상의 방법이다. 그러나 용접변형을 방지하는 것은 현실적으로 불가능하므로 용접 후 효율적인 교정방법을 함께 검토해야 한다. 따라서 체계적인 용접변형 제어를 위해서는 구조물의 형태와 작업조건에 따라 방지대책을 적용할 것인지 아니면 교정방법을 적용할 것인가를 계획하고 그 구체적인 방법에 대해서도 검토해야 한다.

여기서는 다양한 용접변형 방지법/교정법을 소개하여 각 시공조건에 따라 효율적이고 효과적인 방법을 선택하는데 도움이 되고자 한다.

2. 용접변형의 경감·방지대책

용접변형의 경감 및 방지대책으로는 크게 다음과 같

은 3가지 방법으로 분류할 수 있다. ①설계상의 대책(용접부 저감, 이음부위치 및 형태변경, 구조변경, 형강 사용에 의한 강성증대 등) ②용접시공상의 대책(용접입 열량의 저감, 용접법의 변경, 용접순서, 적층법의 변경, 치공구 사용 등) ③역변형법 등이 있다. 이하 용접변형 경감을 위해 많이 사용하고 있는 용접변형 방지용 지그의 특성과 변형 경감방지대책에 소개하고자 한다.

2.1 용접변형 방지용 지그

공장 등에서 실용적인 용접지그는 부재를 정위치에 고정시켜주는 도구, 용접변형을 방지하기 위한 도구, 그리고 용접작업위치를 변화시켜주는 장치 등을 포함하고 있다. 여기서는 용접변형을 방지하기 위한 도구(지그)에 대해 알아보도록 한다. 일반적으로 용접변형 방지용 지그라 하여도 모든 변형을 구속하는 것이 아니라 각변형은 구속하면서 면내변형(횡/종수축)은 자유롭게 발생시켜 용접잔류응력을 저감시킨다.

그림 1은 스트롱백의 크기에 따른 효과를 실험결과로부터 보여주고 있다. 결과에 의하면 두께, 폭, 높이가 증가할수록 변형방지효과는 증가하나 어느 정도 증가하면 각변형 방지효과는 떨어지고 지그의 자체중량만 증가된다. 따라서 일반적으로 지그의 크기는 운반성과

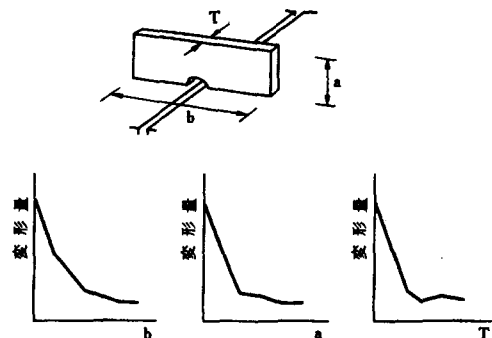


그림 1 Angular distortion by change the dimension of strongback

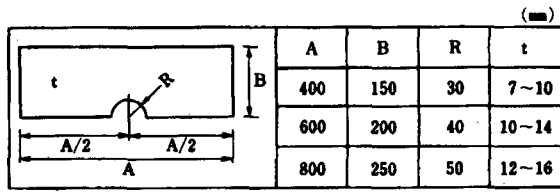


그림 2 General dimension of Strongback

경제성을 고려하여 중간두께 이상의 부재에 그림 2와 같은 크기를 공장내에서 표준화하여 사용된다.

2.2 종굽힘 변형

종굽힘변형은 주로 용접길이가 길고, 부재의 중립축과 용접부가 일치하지 않을 경우 발생하는 변형이다. 주로 선체의 종굽힘강도를 향상시키기 위해 사용되는 T형 Built-Up재 용접시 많이 발생한다. 이를 방지하기 위해 기존에 탄성역변형법과 최근 고주파가열에 의한 용접에 의해 발생하는 종굽힘모멘트를 상쇄시키는 방법에 대해 소개하고자한다. 특히 용접과 동시에 웨브상부에 고주파 가열에 의해 역모멘트를 발생시켜 용접에 의한 종굽힘모멘트를 방지하는 방법은 생산성을 극대화시킬 수 있으므로 일부 조선소에서 적용하고 있어 여기서 소개하고자한다.

그림 3은 Built-Up재에 대해 고주파가열과 용접을 동시에 실시하여 발생하는 온도분포(t=90sec)를 보여 주고 있고, 그림 4는 고주파 가열위치에 따른 종굽힘변형의 변화량을 보여 주고 있다. 이때 가열온도는 430℃(코일로부터 100mm 떨어져있는 곳의 온도)이고 중립축으로부터 가열위치까지의 거리(Ni)를 E4(145mm), E5(165mm), E6(205mm), E7(225mm)로 변화시켰다. 종굽힘변형은 가열위치가 225mm에서 ±10mm 이내 변형이 제일 작게 나타났고 중립축으로부터 열원까지의 거리(Ni)가 짧을수록 위로 볼록한 변형이 최대 50mm까지 발생하였다. 이것은 중립축으로부터 고주파 열원까지의 거리가 짧을수록 고주파가열에 의해 발생하

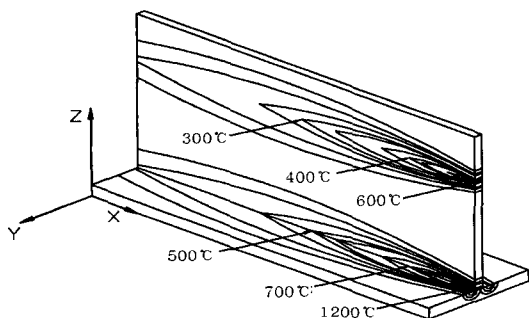


그림 3 Temperature distribution by welding and induction heating

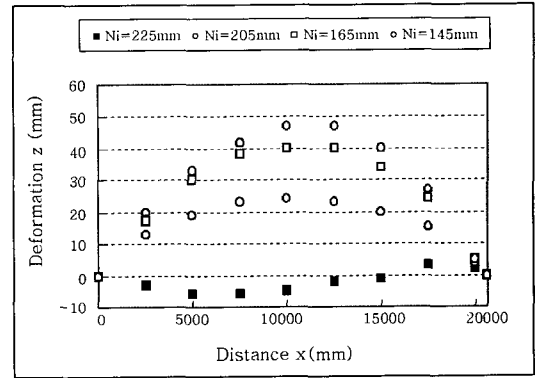


그림 4 Longitudinal deformation by location of induction heating

는 모멘트(Mi)가 용접에 의해 발생하는 모멘트(Mw)보다 작기 때문이다.

그림 5는 종굽힘변형을 방지하기 위한 방법으로 동일한 길이와 단면을 가진 부재에 대해 다음 4가지 방법에 대해 검토하였다. 먼저 ①전혀 구속을 하지 않은 경우, ②정반에 부재가 밀착하도록 위에서 하중을 가한 경우, ③ 용접종굽힘변형의 반대방향으로 역변형이 발생하도록 하중을 가한 상태에서 용접하는 경우, ④ ③번의 경우 보다 더 많은 역변형을 준 상태에서 용접하는 경우에 대해 검토하였다. 이때의 종굽힘변형량을 보면 구속하더라도 역변형을 주지 않으면 용접변형 저감효과 없으며, ④의 경우가 제일 작게 발생하여 적절한 역변형을 준 것을 알 수 있다.

그림 6은 그림 5 ④의 경우에 있어서 용접 후 구속을 제거하는 시간에 따라 종굽힘 변형량의 변화를 검토하기 위해 실험을 실시한 결과, 용접 후 부재의 온도가 실온으로 생각되었을 때까지 구속을 실시해야 종굽힘변형을 방지할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 이것은 생

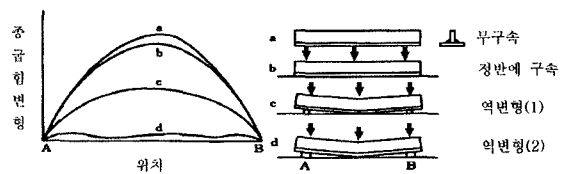


그림 5 Effect of restraint on the longitudinal deformation

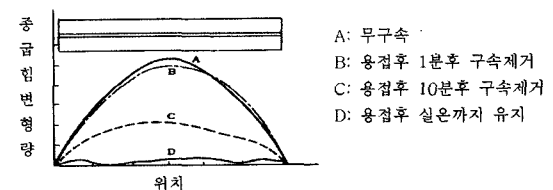


그림 6 Effect of release time of restraint load on the longitudinal deformation

산성과 밀접한 관계가 있으므로 대량생산을 하는 경우 적절한 방법이라고 할 수 없다. 이 밖에도 용접과 동시에 하부 플랜지를 수냉하는 방법도 있으나 이는 하부 플랜지 두께가 약 10mm 이내에서는 변형저감효과가 있으나 두께가 두꺼워질수록 그 효과는 저감된다.

2.3 각변형

지그를 이용하여 각변형을 방지하는 방법에 대해서 알아보기로 하자.

그림 7은 스트롱백의 간격에 따른 각변형량의 변화를 보여 주고 있다. 스트롱백의 간격이 짧고, 중앙부보다 단부에 배치하는 것이 각변형이 작게 하는데 효과적인 것을 보여주고 있다. 그러나 실제 작업에서는 너무 좁게 스트롱백을 설치하면, 용접봉의 움직임이나 설치 및 제거작업의 과다소요 그리고 경제성 문제점이 발생한다. 따라서 일반적으로 모재의 두께가 10-20mm정도인 경우 스트롱백의 간격은 약 600mm정도가 적당하다.

그림 8은 각변형을 방지하기 위해 필렛용접부가 인장응력이 걸리도록 구조물을 위로 볼록하게 역변형을 주고, 이때 인장응력의 크기에 따라 각변형방지효과가 다르게 나타난다. 한편 구속지그의 제거시간은 용접후 바로 제거하여도 각변형방지 효과가 있다. 이는 종굽힘변형 방지를 위한 지그 제거시간(그림 6 참조)과는 대조적이다. 이것은 각변형의 발생메커니즘이 부재의 두께 방향의 온도분포의 차이에 의한 것으로 두께방향의 온

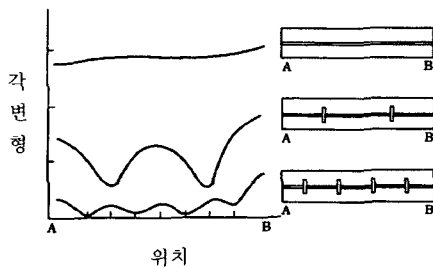


그림 7 Effect of Space of strongback on angular distortion

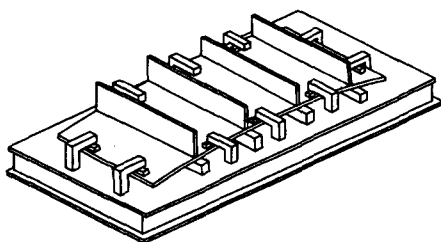


그림 8 Apparatus for Welding T-Joints Submitted to Elastic Prestrain by Jigs

도 차이는 용접열원이 통과 후 짧은 시간에 두께방향의 온도분포가 거의 차이가 없기 때문이다. 반면 종굽힘변형을 유발시키는 온도분포는 길이방향으로 길고 장시간 온도의 차이를 가지고 있으므로 용접부가 실온에 가까워질 때까지 구속해야한다.

그림 9는 두꺼운 강판에서의 각변형을 방지하기 위해 전면/후면의 용착비에 따른 각변형의 영향에 대해 보여 주고 있다. 용착비는 부재의 두께에 따라 다르며, 스트롱백에 의한 영향을 작은 것으로 나타났다. 이러한 방법은 특히 두꺼운 강판의 경우 각변형이 발생하면 교정하기가 매우 어렵기 때문에 철저한 각변형 방지방법을 실시하는 것이 최선책이라 할 수 있다.

그 밖에 맞대기용접에서의 각변형을 감소 및 방지하는 방법으로는 역변형법이 있다. 용접전 용접에 의해 발생하는 각변형을 예측하여 미리 역변형을 주고 용접이 완료되면 각변형이 발생하지 않게 된다. 이방법의 단점은 역변형량이 큰 경우 이를 교정하는데 많은 노력이 필요하다. 따라서 그 역변형량을 정확히 예측하기 위해서는 많은 측정Data나 실물 크기의 구조물 실험을 실시하여 결정해야한다. 따라서 최근에는 많이 사용하지 않는다.

3. 용접변형의 교정대책

용접변형을 방지하기 위해 다양한 대책을 수립하여 용접함에도 불구하고 변형이 허용범위를 넘는 경우가 있다. 이때 변형교정방법으로 많이 사용하는 것은 열을 이용한 선상 가열법 및 점가열법, 그리고 소성가공에 의한 프레스나 롤러에 의한 교정법 등이 있다. 변형교정에 있어서 제일 까다로운 부분은 박판변형으로 가열원의 열량과 가열방법에 세심한 배려와 경험이 필요하다. 최초 교정작업의 계획이 잘못 수립하여 작업을 실

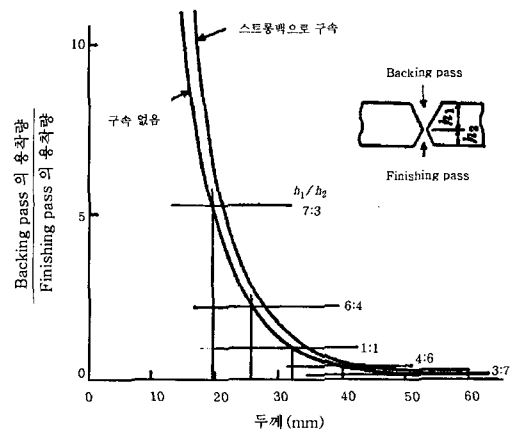
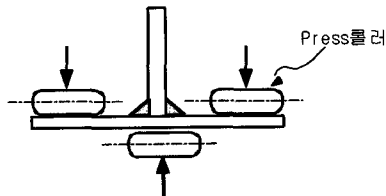


그림 9 Groove design Most Suitable to Minimizing Angular Changes in Butt Joints of Various Thicknesses

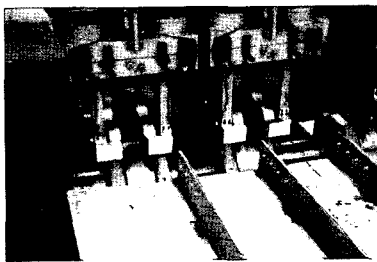
시하는 경우 영구적으로 구조물의 변형을 교정하지 못하는 경우가 있다. 또한 발생한 변형을 교정하면 다른 부분에 변형이 이동하는 경우도 발생하므로 세심한 주의가 필요하다.

그림 10은 프레스 롤러에 의해 소성가공법에 의한 용접변형교정법을 보여주고 있다. 이 방법은 정형화된 구조물에 많이 사용되며, 열원을 사용하지 않으므로 추가적인 변형이 발생되지 않는다.

그림 11은 가스토치에 의한 선상가열법을 보여주고 있으며, 맞대기용접이나 필렛용접시 발생하는 굽힘변형을 교정하는데 사용된다. 선상가열의 열원으로는 가스뿐 아니라 고주파를 이용한 열원도 개발되어 시판되고 있다. 선상가열법의 기본 원리는 강판은 가열하면 수축되며, 그 수축량은 두께방향에 따라 다르게 발생한다는 원리를 이용한 것이다. 주의할 것은 한번 가열된 곳을 다시 가열하며 수축변형이 거의 발생되지 않는다. 따라



(a) Schematic drawing of press roller



(b) Device of press roller

그림 10 Press roller method

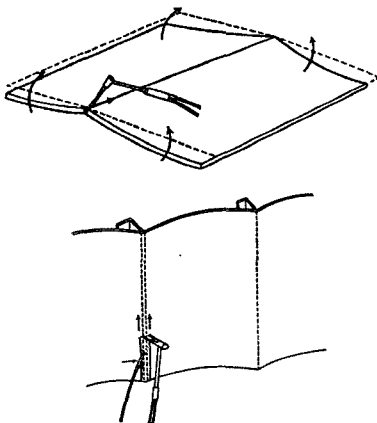


그림 11 Line heating method

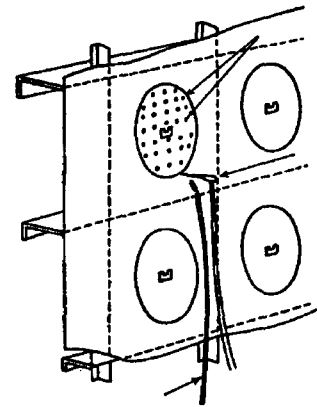


그림 12 Spot heating method

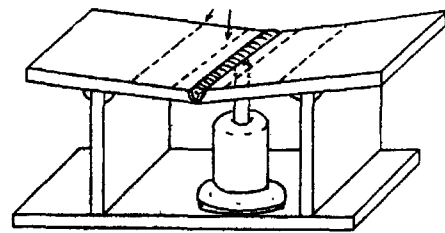


그림 13 Heating and press method

서 이러한 수축의 기본원리와 특성을 잘 파악하여 적용해야 한다.

그림 12는 점가열법의 적용 예를 보여주고 있다. 이는 강성이 강한 프레임에 판을 용접할 때 발생하는 변형을 교정할 때 주로 많이 사용된다. 실제 구조물로는 선체의 Deck House, RO-RO선, 여객선, 전철차량, 전원박스, 저장탱크 등의 외판의 용접변형 교정에 사용된다. 점가열방법은 먼저 석필을 이용하여 50~10mm 간격으로 격자를 긋고 그 교차점을 600~650℃로 가열 후 수냉한다. 가열작업순서는 변형이 작은 곳에서 중앙으로 가열해야만 한다.

그림 13은 가열가압법을 이용한 변형교정방법을 보여주고 있다. 이 방법은 프레스나 유압재를 이용하여 변형된 부분을 가압하면 선상가열하는 방법이다. 이 방법의 원리는 가열에 의해 팽창하려는 부분을 외력으로 구속하여 소성변형을 크게 발생시켜 구속을 제거한 후에 가열에 의한 변형을 크게 유발시켜 교정하는 방법이다. 가압시 주의 할 점은 강재의 온도가 250~300℃ 부근에서는 청열취성이 발생하기 쉽기 때문에 가압을 실시하지 않도록 해야 한다.

4. 결 언

용접시 발생하는 변형을 방지·교정하는 방법에 대해 소개하였다. 구조물의 형상이 같아도 그 구조물의 작업

이력과 재료특성에 따라 서로 다른 용접변형이 발생될 수 있으므로 단일하게 교정작업을 해서는 안 된다. 또한 교정작업을 하는 경우 후 공정으로 갈수록 변형이 변형을 유발시키므로 현 공정에서 발생한 변형은 그 공정 내에서 교정하여 다음 공정으로 이동하는 것이 좋다. 용접변형 교정작업은 생산성 저하는 물론 구조물의 외관을 손상시킬 뿐 아니라 재료의 성질을 열화시키므로 용접변형을 최소화할 수 있는 용접공법을 적용해야 한다.

보통 강구조물을 취급하는 업체에서는 변형을 교정을 위한 "표준작업지침서"를 제작하여 구비하고 있으나 대부분 외국 자료를 번역한 것이 전부이다. 이제는 우리나라도 세계적인 조선업계의 선두주자에 맞도록 자체 연구개발을 통해 IT기술과 접목시켜 변형방지 및 교정작업을 체계적이고 합리적으로 구축할 필요가 있다고 생각한다.

참 고 문 헌

1. 박정웅, 장경호, 이해우, 안규백: 고주파가열에 의한 Built-Up재의 용접중급합 변형방지, 23-3 (2005), 259~265
2. Kim, Y.C., Chang, K.H. and Horikawa, K., Production Mechanism for Out-of-Plane Deformation in Fillet Welding and Investigation of Generality, Journal of the Japanese Welding Society, 17-2 (1999)
3. Sasayama, Y., Masubuchi, K. and Moriguchi, S., Longitudinal Deformation of a Long Beam due to Fillet Welding, Welding Journal, Vol.3 (1955)
4. Tsuji, I. and Yamaguchi, K., Distortion and Shrinkage Stresses in Edge Welding of Beams, Journal of the Western Society of Naval Architects of Japan, Vol. 42 (1967) in Japanese
5. Masubuchi, K. and Papazoglou, V.J., Analysis and control of Distortion in Welded Aluminum Structures, SNAME Transaction, Vol.86 (1978)
6. Aoki, H., Nagai, K., Kuwajima, H. and Watanabe, M., Estimation of Welding Deformations for Actual Plate Girders, Journal of the Japanese Welding Society, 50-10 (1981) in Japanese
7. Jang, C.D. and Seo S. I., On the Prediction of Deformation of Welded Built-up Beams, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 31-3 (1994)
8. Park, J.U.: Effects of Initial Defects on Welding Deformation and Residual Stress, Journal of KWS, 17-4 (1999)



- 박정웅(朴正雄)
- 1966년생
- 조선대학교 토목공학과
- 용접잔류응력 및 변형, 용접강도
- e-mail:jupark@mail.chosun.ac.kr